

*ДИАГРАММА ДЛЯ ГИБРИДНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
С ОГРАНИЧЕНИЯМИ СКОРОСТИ И ЕЁ ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНОЙ*

Ю.П. ДОБРОБАБА, Г.А. КОШКИН, В.А. МАХОВА

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская 2,
электронная почта: viktorya.mah@yandex.ru*

При управлении перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока обычно обеспечивается: либо максимальное быстродействие; либо минимальное потребление электроэнергии за цикл. Предлагаются осуществлять перемещение исполнительного органа электропривода за заданное время при минимально возможном потреблении электроэнергии. Такое управление перемещением является гибридным. Разработаны четыре гибридные диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока. В данной работе рассматривается диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной.

Ключевые слова: диаграмма перемещения исполнительного органа, гибридный управление, электропривод.

Существует два основных варианта управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока, при которых достигается максимальное быстродействие или минимальное потребление электрической энергии.

Предлагается гибридное управление перемещением исполнительного органа электропривода за заданное время при минимально возможном потреблении электрической энергии.

В настоящее время разработаны:

-диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением второй производной скорости[1];

-диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости[2].

В данной работе предлагается разработать диаграмму для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной, которая обеспечивает требуемое перемещение исполнительного органа электропривода

за заданное время с минимально возможным потреблением электроэнергии. Эту диаграмму целесообразно использовать при больших перемещениях исполнительного органа электропривода.

На рисунке представлена диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной, состоящая из пяти этапов. На первом и пятом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $\omega_{\max}^{(2)}$; на втором и четвертом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна минимальному значению $\omega_{\min}^{(2)}$; на третьем этапе вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. Длительность первого и пятого этапов равна t_1 , длительность второго и четвертого этапов равна t_2 ; длительность третьего этапа равна t_4 . В момент времени t_1 первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $\omega_{\max}^{(1)}$; в момент времени $(t_1 + 2t_2 + t_4)$ первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком «минус» $-\omega_{\max}^{(1)}$. На третьем этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода равна максимальному значению ω_{\max} . За время цикла $T_{\text{ц}} = 2t_1 + 2t_2 + t_4$ исполнительный орган электропривода перемещается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для определения параметров гибридной диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной найдены аналитические зависимости координат электропривода от времени при его движении в соответствии с указанной диаграммой.

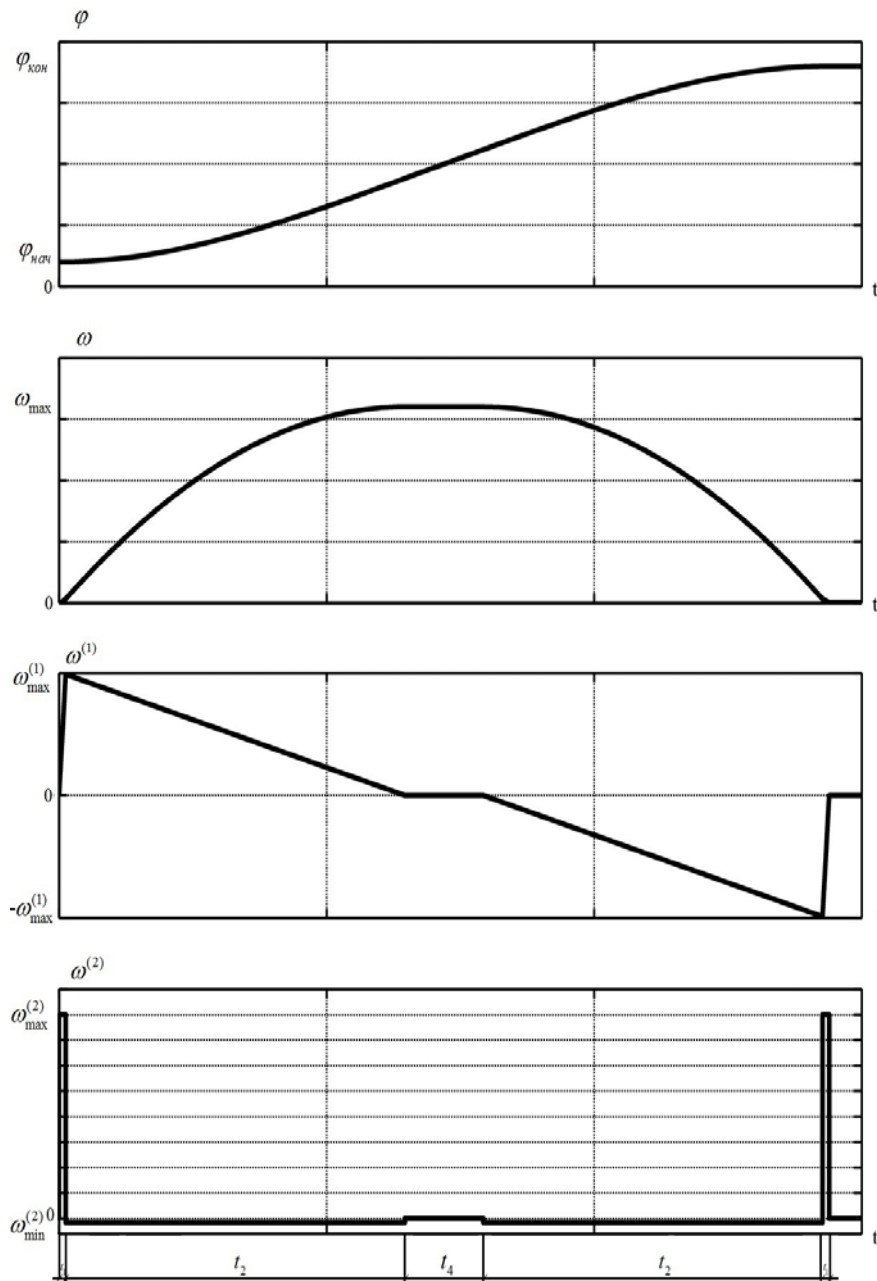


Рисунок 1 – Диаграмма для гибридного управления перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной

Этап 1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t;$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t^3;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} ;$$

$$U(t) = \frac{1}{2} C_{\text{е}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{со}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} ,$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;

$I_{\text{я}}^{(1)}$ – первая производная тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{\text{А}}{\text{с}}$;

U – напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$C_{\text{е}}$ – коэффициент пропорциональности между скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;

$C_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;

$L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;

J – момент инерции электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$M_{\text{со}}$ – момент сопротивления электропривода, Н·м.

При $t = t_1$

$$\omega_1^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 ;$$

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^2 ;$$

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^3 .$$

Так как $\omega_1^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(1)}$, то

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 .$$

Этап 2. В интервале времени $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\text{min}}^{(2)} ;$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot (t - t_1) ;$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^2 + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot (t - t_1)^2 ;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) +$$

$$+\frac{1}{2}\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t-t_1)^2 + \frac{1}{6}\omega_{\min}^{(2)} \cdot (t-t_1)^3.$$

При $t = t_1 + t_2$

$$\omega_2^{(2)} = \omega_{\min}^{(2)};$$

$$\omega_2^{(1)} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2;$$

$$\omega_2^{(1)} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2}\omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2;$$

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 t_2^2 \right) + \frac{1}{6}\omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^3.$$

Так как $\omega_2^{(1)} = 0$, то

$$\omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 = -\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1.$$

Так как $\omega_2 = \omega_{\max}$, то

$$\omega_{\max} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + \frac{1}{2}t_1 t_2 \right) = \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(1)} \cdot (t_1 + t_2).$$

При этом справедлива зависимость

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{3}t_1 t_2^2 \right).$$

Для электрических координат электропривода на втором этапе справедливы зависимости:

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[t_1 - \frac{t_1}{t_2} \cdot (t-t_1) \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2};$$

$$U(t) = C_{\text{е}}\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t-t_1) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t-t_1)^2 \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[t_1 - \frac{t_1}{t_2} \cdot (t-t_1) \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2}.$$

Этап 3. В интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_4)$:

$$\omega^{(2)}(t) = 0;$$

$$\omega^{(1)}(t) = 0;$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + \frac{1}{2}t_1 t_2 \right);$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 \right) + \\ + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2).$$

При $t = t_1 + t_2 + t_4$

$$\omega_3 = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right).$$

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right].$$

Для электрических координат электропривода на третьем этапе справедливы зависимости:

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}}.$$

Этап 4. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_4) \leq t \leq (t_1 + 2t_2 + t_4)$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\text{min}}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4);$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4)^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right] + \\ + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4) + \frac{1}{6} \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4)^3.$$

При $t = t_1 + 2t_2 + t_4$

$$\omega_4^{(2)} = \omega_{\text{min}}^{(2)};$$

$$\omega_4^{(1)} = \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot t_2 = -\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1.$$

$$\omega_4 = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot t_2 = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^2;$$

$$\varphi_4 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{5}{6} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right] + \frac{1}{6} \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot t_2^3 =$$

$$= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right].$$

Для электрических координат электропривода на четвертом этапе справедливы зависимости:

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left[M_{\text{со}} - J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4) \right];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2};$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4)^2 \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left[M_{\text{со}} - J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4) \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2}.$$

Этап 5. В интервале времени $(t_1 + 2t_2 + t_4) \leq t \leq (2t_1 + 2t_2 + t_4)$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4);$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right] + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^3.$$

При $t = 2t_1 + 2t_2 + t_4$

$$\omega_5^{(2)} = \omega_{\text{max}}^{(2)};$$

$$\omega_5^{(1)} = 0;$$

$$\omega_5 = 0;$$

$$\varphi_5 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right].$$

Так как $\varphi_5 = \varphi_{\text{кон}}$, то

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right];$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \omega_{\text{max}}^{(1)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3} t_1^3 + t_1 t_2 + \frac{2}{3} t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \cdot (t_1 + t_2) \cdot t_4 \right].$$

Для электрических координат электропривода на пятом этапе справедливы зависимости:

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - t_4) \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)};$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^2 \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[-t + (t - t_1 - 2t_2 - t_4) \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)}.$$

Для параметров диаграммы справедливы зависимости:

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}};$$

$$t_2 = 2 \cdot \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}} - \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}};$$

$$t_4 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{max}}} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}} + \frac{2}{3} \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}};$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{max}}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}} + \frac{2}{3} \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = - \frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{t_2}.$$

Если $t_4 = 0$, то $\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}} = \varphi_{\text{гр}}$.

При этом

$$\varphi_{\text{гр}} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{max}}^2}{\omega_{\text{max}}^{(1)}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{max}}}{\omega_{\text{max}}^{(2)}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(1)}.$$

Этап 1. Зависимость мощности, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени имеет вид

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot [M_{\text{co}} \cdot t^2 + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t^3] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2M_{\text{co}} J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t + J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t^2 \right\} + \\ + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t].$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за первый этап равна

$$W_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^4 + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^3 + \\ + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2.$$

Этап 2. В интервале времени $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$:

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1)^2 \right] + \right. \\ \left. + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1^3}{t_2} \cdot (t - t_1) - \frac{3}{2} \cdot \frac{t_1^2}{t_2} \cdot (t - t_1)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1)^3 \right] \right\} + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2M_{\text{co}} J \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[t_1 - \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1) \right] + \right. \\ \left. + J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2 \cdot \frac{t_1^2}{t_2} \cdot (t - t_1) + \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1)^2 \right] \right\} - \\ - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \frac{t_1}{t_2} + J \omega_{\max}^{(2)} \left[\frac{t_1^2}{t_2} - \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1) \right] \right\};$$

$$\begin{aligned}
 W_2 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 \right) + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^3 t_2 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 t_2 - \\
 & - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

Этап 3. В интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_4)$:

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2; \\
 W_3 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_4.
 \end{aligned}$$

Этап 4. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_4) \leq t \leq (t_1 + 2t_2 + t_4)$:

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} (t - t_1 - t_2 - t_4)^4 \right] - \right. \\
 & - J \omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{t_1^3}{t_2} + \frac{1}{2} t_1^2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4) - \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4)^3 \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 - 2 M_{co} J \omega_{max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4) + \right. \\
 & \left. + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4)^2 \right\} - \\
 & - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \frac{t_1}{t_2} - J \omega_{max}^{(2)} \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_4) \right\}; \\
 W_4 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 \right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^3 t_2 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 - \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 t_2 -
 \end{aligned}$$

$$-\frac{L_{я}J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я}J^2}{C_M^2} \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.$$

Этап 5. В интервале времени $(t_1 + 2t_2 + t_4) \leq t \leq (2t_1 + 2t_2 + t_4)$:

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^2 \right] + \right. \\ \left. + J \omega_{max}^{(2)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^3 \right] \right\} + \\ + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + 2M_{co}J\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - t_4) \right] + \right. \\ \left. + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_4) + (t - t_1 - 2t_2 - t_4)^2 \right] \right\} + \\ + \frac{L_{я}J}{C_M^2} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - t_4) \right] \right\}; \\ W_5 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^4 + \\ + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 + \\ + \frac{L_{я}J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я}J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.$$

Суммарная электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за цикл:

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right] + \\ + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot (2t_1 + 2t_2 + t_4) + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2).$$

Так как $\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_4 \right] = (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$;

$\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 = \omega_{max}^{(1)}$ и $(2t_1 + 2t_2 + t_4) = T_{ц}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot T_{ц} + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(1)} \right]^2 \cdot (t_1 + t_2).$$

Так как $(t_1 + t_2) = 2 \cdot \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\max}^{(1)}}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot T_{\text{ц}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \omega_{\max} \omega_{\max}^{(1)}.$$

Так как $T_{\text{ц}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\max}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\max}^{(1)}} + \frac{2}{3} \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\max}^{(2)}}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot \left[\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\max}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\max}}{\omega_{\max}^{(1)}} + \frac{2}{3} \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\max}^{(2)}} \right] + \frac{4}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \omega_{\max} \omega_{\max}^{(1)}.$$

При $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ суммарная электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за цикл имеет минимальное значение.

Так как $\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}$ и $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, то суммарная электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за цикл имеет зависимость:

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot \left[\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\max}^{(1)}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right] + \frac{4}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \omega_{\text{доп}} \omega_{\max}^{(1)}.$$

Возьмем первую производную суммарной электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, за цикл по максимальному ускорению исполнительного органа электропривода и приравняем её к нулю

$$\frac{\partial W}{\partial \omega_{\max}^{(1)}} = \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot \left[-\frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\left[\omega_{\max}^{(1)} \right]^2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right] + \frac{4}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \omega_{\text{доп}} = 0.$$

Из полученного уравнения определяется экстремальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода

$$\omega_{\max}^{(1) \cdot \text{экстр}} = \sqrt{\frac{2 \omega_{\text{доп}} \omega_{\text{доп}}^{(2)}}{2 \cdot \frac{J^2}{M_{\text{со}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}} \omega_{\text{доп}}^{(2)} + 1}},$$

при котором якорная цепь электропривода потребляет минимальное количество электроэнергии за цикл.

При этом для параметров диаграммы справедливы зависимости:

$$t_{1\text{экстр}} = \frac{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$t_{2\text{экстр}} = 2 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$t_{4\text{экстр}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$T_{\text{ц.экстр}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$\omega_{\text{min.экстр}}^{(1)} = -\frac{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}}{t_{2\text{экстр}}}.$$

При $t_{4\text{экстр}} = 0$ перемещение (поворот) исполнительного органа электропривода имеет граничное экстремальное значение $\varphi_{\text{гр.экстр}}$, а длительность цикла равна граничному экстремальному значению $T_{\text{ц.экстр.гр}}$.

При этом

$$\varphi_{\text{гр.экстр}} = \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^2}{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \omega_{\text{max.экстр}}^{(1)};$$

$$T_{\text{ц.экстр.гр}} = 4 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)}}.$$

В данной работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры: $C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}$; $L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}$;

$$J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

На допустимые значения угловой скорости и её первой и второй производных наложены ограничения $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

$$\omega_{\text{доп}}^{(1)} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{доп}}^{(2)} = 400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}.$$

Момент сопротивления электропривода равен $M_{\text{со}} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

При этом граничное экстремальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равно:
 $\varphi_{\text{гр.экстр}} = 1365,397189$ рад.

Представленная на рисунке диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной имеет следующие параметры:

$$\begin{aligned} (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) &= 1600 \text{ рад}; \quad \omega_{\text{max.экстр}}^{(1)} = 49,51875684 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad t_{1\text{экстр}} = 0,123796892 \text{ с}; \\ t_{2\text{экстр}} &= 6,338400876 \text{ с}; \quad t_{4\text{экстр}} = 1,466267568 \text{ с}; \\ T_{\text{ц.экстр}} &= 14,39066311 \text{ с}; \quad \omega_{\text{min.экстр}}^{(2)} = -7,8125 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \end{aligned}$$

$$W = 4000 + 287,8132621 + 84,51201167 = 4372,325274 \text{ Дж}.$$

Если $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}$ и $\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$ и $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$t_2 = 2 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$t_4 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$T_{\text{ц.гр}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(1)} = -\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{t_2}.$$

При $t_4 = 0$ перемещение (поворота) исполнительного органа электропривода достигает критического граничного значения

$$\varphi_{\text{гр.кр}} = \frac{2}{3} \cdot \omega_{\text{доп}} \cdot \left[4 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right],$$

а длительность цикла равна критическому граничному значению

$$T_{\text{ц.кр.гр}} = 4 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}.$$

Для рассматриваемого электропривода критическое граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равно $\varphi_{гр.кр} = 832$ рад.

Если $\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}$, $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ и $t_4 = 0$, то

$$t_1 = \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$t_2 = 2 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\max}^{(1)}} - \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

$$T_{ц1} = 4 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\max}^{(1)}};$$

$$\omega_{\min}^{(1)} = -\frac{\omega_{\max}^{(1)}}{t_2};$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^2}{\omega_{\max}^{(1)}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} \cdot \omega_{\max}^{(1)}.$$

Так как

$$\omega_{\max}^{(1)} = 4 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{T_{ц1}},$$

то справедлива зависимость для длительности цикла

$$T_{ц.гр} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \sqrt{\frac{9}{16} \cdot \frac{(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^2}{\omega_{\text{доп}}^2} + 4 \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}}.$$

При выполнении этого условия справедливы диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением второй производной скорости, рассмотренное в [1], и диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением скорости и её второй производной.

Если для заданного перемещение (поворота) исполнительного органа электропривода выполняется условие

$$\varphi_{гр.кр} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \varphi_{гр.экстр},$$

то длительность цикла можно изменять в следующем интервале

$$T_{ц.гр} \leq T_{ц} \leq T_{ц1}.$$

Если для заданного перемещение (поворота) исполнительного органа электропривода выполняется условие

$$\varphi_{гр.экстр} \leq (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}),$$

то длительность цикла можно изменять в следующем интервале

$$T_{ц.гр} \leq T_{ц} \leq T_{ц.экстр}.$$

Если задана длительность цикла $T_{ц}$ и $\omega_{max} = \omega_{доп}$ и $\omega_{max}^{(2)} = \omega_{доп}^{(2)}$, то справедливы соотношения:

$$\omega_{max}^{(1)} = \frac{3}{4} \cdot \left(T_{ц} - \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} \right) \cdot \omega_{доп}^{(2)} - \sqrt{\frac{9}{16} \cdot \left(T_{ц} - \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} \right)^2 \cdot [\omega_{доп}^{(2)}]^2 - 2\omega_{доп}\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$t_1 = \frac{\omega_{max}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$t_2 = 2 \cdot \frac{\omega_{доп}}{\omega_{max}^{(1)}} - \frac{\omega_{max}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$t_4 = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{доп}}{\omega_{max}^{(1)}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{max}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$\omega_{min}^{(1)} = -\frac{\omega_{max}^{(1)}}{t_2}.$$

В таблице приведены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода, обрабатывающего перемещение (поворот) исполнительного органа $\square \varphi = (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 1600$ рад за заданное время. При этом $T_{ц.экстр} = 14,39066311$ с и $T_{ц.гр} = 12,8$ с.

Таблица

$T_{ц},$ с	$\omega_{\max}^{(1)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$t_1,$ с	$t_2,$ с	$t_4,$ с	$\omega_{\min}^{(2)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	$W,$ Дж
14,39066311	49,51875684	0,123796892	6,338400876	1,466267568	-7,8125	4372,325274
14,35	50	0,125	6,275	1,55	$-7\frac{243}{251}$	$4372\frac{1}{3}$
13,44	64	0,16	4,84	3,44	$-13\frac{27}{121}$	$4378\frac{2}{75}$
12,8	80	0,2	3,8	4,8	$-21\frac{1}{19}$	$4392\frac{8}{15}$

Таким образом, задавшись значением длительности цикла $T_{ц}$, можно определить параметры гибридной диаграммы управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и второй её производной.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, В.А. Махова. Диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением второй производной скорости.// Научные труды КубГТУ -Краснодар, 2016 №5. <http://ntk/kubstu.ru/file/957>.

2. Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, В.А. Махова. Диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости/// Научные труды КубГТУ -Краснодар, 2016 №8. <http://ntk/kubstu.ru/file/1073>.

REFERENCES

1. Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, V.A. Makhova. Diagramma dlya gibridnogo upravleniya peremeshcheniem ispolnitelnogo organa elektroprivoda postoyannogo toka s ogranicheniem vtoroy proizvodnoy skorosti.// Nauchnye trudy KubGTU -Krasnodar, 2016 №5. <http://ntk/kubstu.ru/file/957>.

2. Yu.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, V.A. Makhova. Diagramma dlya gibridnogo upravleniya peremeshcheniem ispolnitelnogo organa elektroprivoda

postoyannogo toka s ogranicheniyami pervoy i vtoroy proizvodnykh skorosti///
Nauchnye trudy KubGTU -Krasnodar, 2016 №8. <http://ntk/kubstu.ru/file/1073>.

*DIAGRAM FOR HYBRID CONTROL THE MOVEMENT OF THE EXECUTIVE
BODY DC ELECTRIC DRIVE WITH SPEED LIMITS AND ITS SECOND
DERIVATIVE*

YU.P. DOBROBABA, G.A. KOSHKIN, V.A. MAKHOVA

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: viktorya.mah@yandex.ru*

When controlling the movement of the executive body of the DC actuator is normally provided by either the maximum speed; or a minimum energy consumption per cycle. Proposed the moving of the executive body of the drive within the specified time at the lowest possible potrebelenii electricity. This motion control is a hybrid. Designed chetyre hybrid chart movement executive body dc drive. In this paper we consider the diagram for a hybrid motion control of the executive body of the DC electric drive with speed limits and its second derivative.

Key words: chart movement of the executive body, the hybrid control, the electric drive.